第30卷 第6期
2016年6月

材料研究学报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH

Vol. 30 No. 6
June 2016

304不锈钢空化水射流表面空蚀损伤研究

吴从前 任瑞铭 刘鹏涛 陈春焕 赵秀娟

(大连交通大学材料科学与工程学院 大连 116028)

摘 要 采用淹没式空化水射流方法对304不锈钢表面进行不同压力和时间的空化水射流处理,用扫描电子显微镜原位跟踪观察处理后的试样表面形貌,研究其空蚀损伤过程及空蚀机理,并对表层组织和304不锈钢变形机理进行了探讨。结果得出,根据损伤程度和作用机理的不同,空蚀损伤区从中心到外围可以分为射流冲击区、过渡区和紊流区三个区,其中射流冲击区损伤最严重,紊流区次之,过渡区最弱。当射流压力为35 MPa、处理40 min时,射流冲击区损伤速度加快,并且呈现明显的疲劳损伤特征,滑移带和晶界处疲劳裂纹萌生和扩展是导致该区损伤剥落的重要原因;在横截面金相组织中,过渡区和紊流区出现比射流冲击区更深的形变孪晶层,且紊流区形变孪晶层厚度达140 μm;在本实验条件下304不锈钢变形方式为滑移为主,孪生为辅。试样在空化水射流的作用下有两种空蚀破坏机理,即交变载荷下疲劳破坏,以及塑性变形、颈缩和剥落导致的弧坑。

关键词 金属材料,空化水射流,空蚀损伤,滑移带,形变孪晶,304不锈钢

分类号 TG141 文章编号 1005-3093(2016)06-0473-08

Cavitation Erosion of 304 Stainless Steel induced by Caviting Water Jet

WU Congqian REN Ruiming LIU Pengtao CHEN Chunhuan ZHAO Xiujuan*

(College of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Manuscript received December 15, 2015; in revised form March 3, 2016.

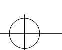
*To whom correspondence should be addressed, Tel: (0411)84106863, E-mail: zhaoxj@djtu.edu.cn

ABSTRACT Cavitation erosion of 304 stainless steel was studied by means of caviting water jet (CWJ) with varying stress and time. By tracking the surface morphology change with scanning electron microscope after the CWJ treatment, the process and mechanism of cavitation erosion were analyzed and the microstructure evolution of the surface and the relevant deformation mechanism were investigated as well. The results are as follows: according to the difference in damage rate and mechanism, the cavitation damage zone can be divided into jet impact zone, transition zone and turbulent zone from the center to the periphery, among them, the damage degree of jet impact zone was the worst, transition zone was the weakest. The damage of jet impact zone was accelerated by the jet pressure 35 MPa for 40 min, and it presented clear characteristics of fatigue damage, the initiation and propagation of fatigue crack in the area of slip band and grain boundary is one of the important reasons leading to the spalling damage; The twin layer of the transition zone and turbulent zone were thicker than that of the jet impact zone in the cross-sectional microstructure, and the thickness of the twin layer in turbulent zone was 140 μm; Under the conditions of this experiment, the main deformation mode of 304 stainless steel is slip deformation, the second is twin deformation. There are two kinds of mechanism of cavitation erosion induced by the cavitating water jet, one is fatigue failure under cyclic loading, the other is arc-shaped pit caused by plastic deformation, necking and spalling.

KEY WORDS metallic materials, cavitating water jet, cavitation erosion, slip band, twin, 304 stainless steel

自19世纪末在船舶螺旋桨叶片上首次发现空蚀现象以来,人们已经对空蚀展开了大量研究[1~3],但其机理仍不十分清楚。已有的研究表明,空蚀过程可以分为孕育期、上升期、平稳期和衰减期四个阶段[1, 4],其中孕育期阶段由于是损伤的开始显得尤为重要。常用的空蚀实验方法有很多,如:文丘里管空蚀实验设备、电火花空蚀实验设备和磁致伸缩仪实验设备等。与上述实验方法相比,空化水射流能够产生大量气泡并且以极高的频率(可达$10^4 s^{-1}$)[5]在试

2015年12月15日收到初稿;2016年3月3日收到修改稿。
本文联系人:赵秀娟,教授
DOI:10.11901/1005.3093.2015.730



样表面破裂, 产生微射流和冲击波, 使试样产生空蚀损伤[6~12]。因此, 可以利用空化水射流进行空蚀研究。

304不锈钢作为应用最为广泛的一种铬-镍不锈钢, 常被用于制作过流部件, 但对其空蚀损伤研究较少[13]。本文选取304不锈钢作为实验材料, 对其进行不同规程的空化水射流处理, 通过观察处理后试样的表面形貌和横截面组织, 对空蚀孕育期内的表面损伤以及空蚀机理进行了探讨。

1 实验方法

实验材料选用厚2.5 mm的工业级冷轧奥氏体304不锈钢板材, 实验前先经固溶处理后得到均匀奥氏体组织。用线切割设备将板材切成Φ 26mm的圆片, 经精磨和抛光处理后再进行空化水射流处理。

采用自制的空化水射流试验机对试样同一位置进行不同时间的淹没式空化水射流处理。处理时试样和喷嘴均淹没在水中, 水射流呈90°角直射试样表面中心部位。实验选用直径为1 mm的圆锥型喷嘴, 靶距为80 mm[14], 水射流压力为25 MPa、30 MPa和35 MPa。

采用ZEISS SUPRA55场发射扫描电子显微镜对空化射流处理后的试样表面形貌进行了原位观察, 并对试样横截面进行了分析。采用FM-700型维氏硬度计对处理后的试样表面显微硬度进行测试, 加载载荷为100gf, 载荷加载时间为15s, 采用LEICA DCM3D型三维视频显微镜对处理后的试样表面粗糙度(Sa)进行测试。

2 实验结果与分析

2.1 表面空蚀损伤

2.1.1 *表面宏观形貌分析* 根据空化水射流处理试样表面形貌, 水射流作用区域从中心到外围可以大致分为三区。图1是35 MPa压力下处理60 min后试样表面宏观损伤形貌和各区对应的低倍形貌。把损伤斑中心一定范围内的损伤区域称为射流冲击区, 直径约为2 mm, 可以看到该区损伤严重, 已经有明显的塑性变形和剥落痕迹(图1a)。与之紧邻区域为过渡区, 该区没有发生明显的塑性变形, 只有一些轻微损伤痕迹(图1b)。再外围区域为紊流区, 可以看到明显的塑性变形痕迹, 原始抛光表面变得凹凸不平, 多晶体协调变形导致晶粒转动显现, 滑移带形貌明显(图1c)。

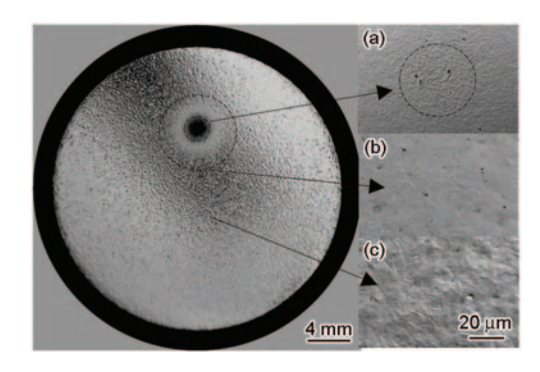


图1 35 MPa压力射流处理60 min试样宏观损伤形貌

Fig.1 Macroscopic damage morphologies of the test specimen after water jet process under 35 MPa for 60 min

根据淹没式空化水射流作用原理对三区形貌差异进行分析, 其示意图如图2所示。从喷嘴喷出的高速射流受到周围液体的阻碍, 射流速度不断减小, 并发散成锥形, 因此射流中心速度最高, 它携带了大量从喷嘴内部产生的诱导空化气泡[15], 对试样中心区造成了最大的动压力和气泡爆破力, 所以射流冲击区损伤最严重。在射流最外围区域, 动态射流与周围静态水发生严重的掺混和卷吸, 流场紊乱, 容易产生漩涡和自由空化气泡[15], 大量自由空化气泡在试样外围区域不断爆破, 产生冲击波和微射流, 形成了紊流区。在这两区之间有一损伤弱区, 该区域射流流速相对较慢, 受到的射流冲击压力小, 只有很少的诱导空化气泡, 并且由于远离周围静态水, 导致自由空化气泡也很少, 因此对试样的作用有限。由于水射流在水中的流动受到水射流形成过程、设备条件和湍流等因素的影响, 三区之间并没有非常严格的界限。

2.1.2 *表面微观形貌分析* 分别对三区损伤形貌进行观察, 分析射流时间对空蚀损伤的影响。由于过渡区变化不明显, 而射流冲击区损伤最为严重, 所以本文着重分析射流冲击区的损伤过程, 并对射

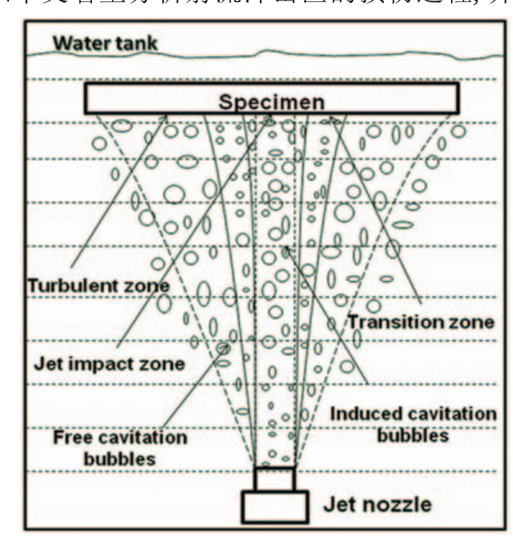


图2 淹没式空化水射流示意图

Fig.2 Schematic diagram of submerged cavitating water jet

流冲击区的滑移带形成和变化做了详细的原位跟踪观察。

(1) 射流冲击区损伤形貌

当射流压力为35 MPa时, 试样表面不同时间的微观形貌变化如图3所示。从水射流处理1 min开始, 每处理2 min跟踪观察一次表面形貌, 发现前8 min试样表面并无明显变化。当水射流处理10 min时, 试样表面的局部已经发生明显的塑性变形, 由于相邻晶粒协调变形导致晶粒转动, 显露出奥氏体晶界, 在晶粒内部出现滑移带, 这些滑移带终止于孪晶界和晶界处, 由于作用力足够大, 激活了孪晶界另一端的滑移源, 其生长方向同原始滑移带方向相同, 均与孪晶界呈45°(图3a), 这是由于汽穴空泡溃灭时的射流作用力打击在金属微区上, 金属在压应力轴的45°方向产生最大的切应力, 使金属滑移变形所造成的。随着射流处理时间的加长(20 min), 在空泡溃灭的反复冲击作用下, 不断形成新的滑移线, 滑移带逐渐变宽, 相邻的滑移带间距不断减小, 多个滑移台阶的叠加导致晶粒整体隆起(图3b), 这一过程可以看作是小于疲劳极限下的疲劳破坏过程。随着喷丸时间的进一步延长(40−60 min), 滑移带逐渐覆盖整个晶粒表面, 使该区域变得模糊。由于晶界和滑移带处位错塞积产生应力, 应变不断累积, 产生严重的应变梯度, 界面逐步脱开形成微裂纹(图3c, 3d)。此时金属的塑性达到极限, 继续冲击作用下不断产生沿滑移带的裂纹, 空蚀孔也不断地扩大和加深, 进而导致材料剥落。

以上表明, 试样射流冲击区空蚀破坏过程是一个由塑性破坏向脆性破坏的转变过程: 滑移带变宽属于塑性破坏, 之后材料在空泡能量反复的作用下达到疲劳极限, 裂纹在晶界和滑移带处萌生和扩展, 材料发生剥落, 属于脆性破坏。

为了更进一步确定滑移带和裂纹的联系, 对滑移带形貌进行了观察分析, 图4a, 4b分别是35 MPa压力下空化水射流处理10 min后滑移带的低倍和A区放大形貌。可以看到滑移带是由很多滑移线聚集而成, 一条滑移线宽约0.1 μm, 呈层状分布。由于各个滑移线导致的滑移台阶不尽相同, 使得滑移带也呈现出凹凸不平的形貌, 还可以看到在滑移带内部出现了明显的裂纹和微孔, 这是由于滑移源的强烈激活和在接触部位的瞬时阻塞所造成的, 正是这些裂纹和微孔导致了样品射流冲击区的损伤与剥落。

(2) 紊流区损伤形貌

对35 MPa压力下空化水射流处理后的紊流区表面形貌随喷丸时间的变化进行了观察分析。可以看到随着水射流处理时间的延长, 滑移带数量明显增加, 且有少量形变孪晶生成, 但是没有发现在射流冲击区观察到的塑性变形坑、空蚀孔和裂纹。在整个处理过程中, 紊流区均没有明显剥落痕迹(图5a, 5b)。这是因为紊流区主要受自由空化气泡的作用,

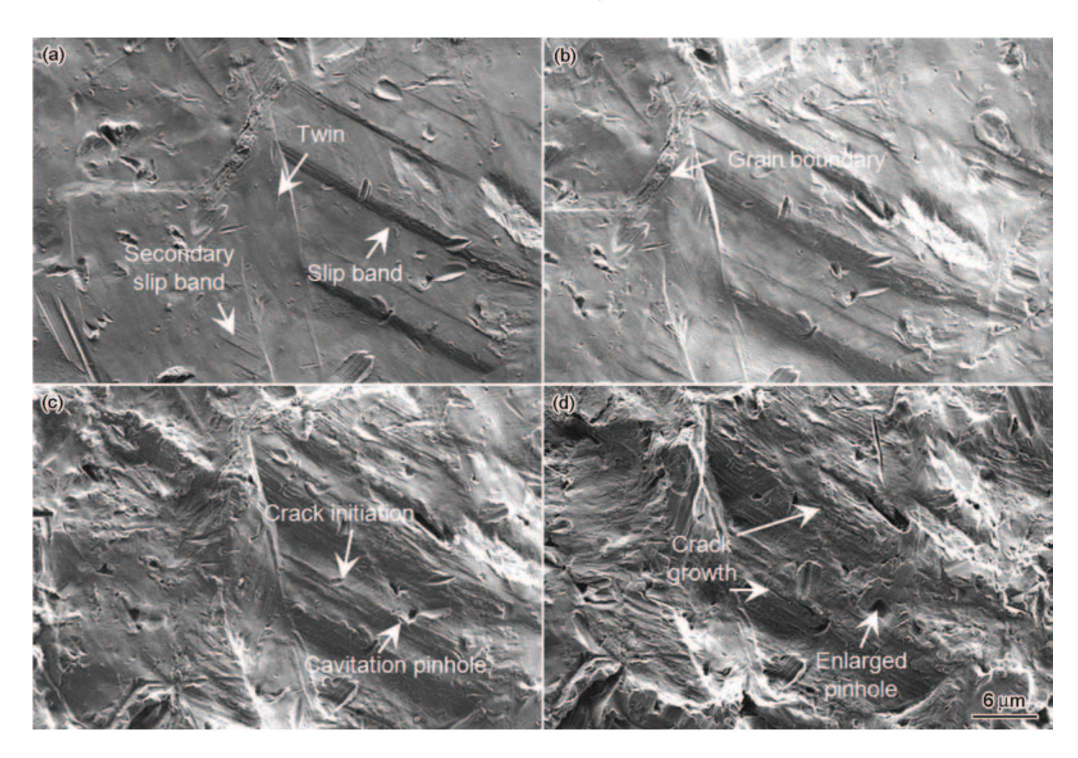


图3 35 MPa射流冲击区表面不同时间形貌观察

Fig.3 Surface morphologies observation of water jet impact zone under 35 MPa for (a) 10 min; (b) 20 min; (c) 50 min; (d) 60 min

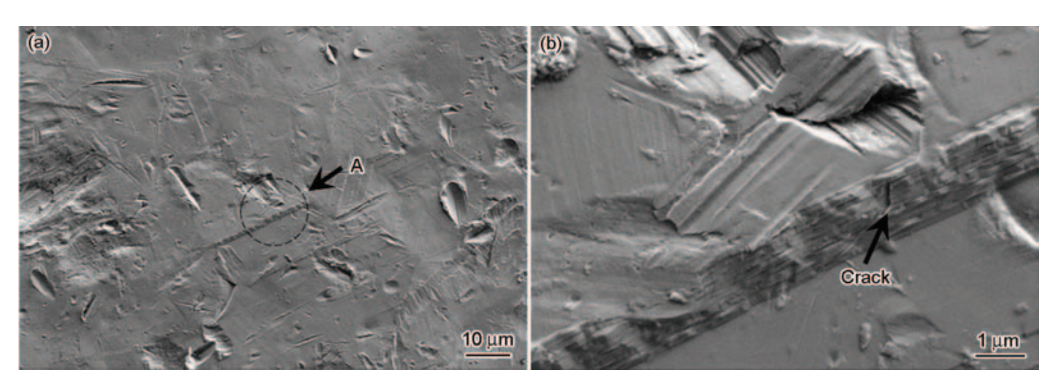


图4 35 MPa水射流处理10 min射流冲击区滑移带的形貌

Fig.4 Morphology of slip band in water jet impact zone after water jet process under 35 MPa for 10 min (a) and (b) enlarged image of A zone in Fig.a

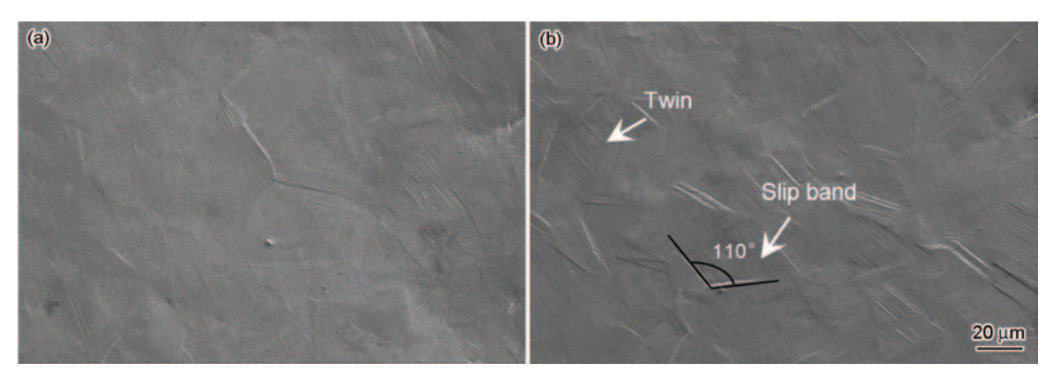


图5 35 MPa水射流处理不同时间紊流区形貌

Fig.5 Morphologies of the turbulent zone after water jet process under 35 MPa for (a) 30 min; (b) 60 min

相比较于射流冲击区的诱导空化气泡, 紊流区的气泡数量较少, 气泡溃灭的频率较少, 分布更加均匀, 并且由于该区域射流流速较小, 射流冲击力也不强, 这使得该区域一直处在塑性变形阶段, 气泡爆破能量被金属的塑性变形吸收。面心立方金属的滑移面为{111}晶面, 该晶面有4个取向, 晶面之间相交角为70.32°或109.28°。因此, 在实验中观察到了如图5b所示约成110°夹角的两组滑移带, 它们分别位于不同取向的{111}滑移面上。

2.1.3 射流压力对空蚀损伤的影响　观察损伤最严重的射流冲击区, 分析射流压力对空蚀损伤的影响, 其结果如图6所示。可以看到, 当射流压力为25 MPa、处理时间为60 min时, 射流冲击区变化不明显, 有一些大的塑性变形坑, 没有发现裂纹和剥落(图6b)。随着压力的升高(30 MPa), 塑性变形变得明显, 由于相邻晶粒协调变形, 晶粒发生转动, 显露出部分奥氏体晶粒, 在晶粒内部有滑移带, 试样表面也出现了裂纹和少量的剥落(图6c); 当水射流压力升高到35 MPa时, 空蚀损伤明显加速, 可以看到大面积的裂纹和空蚀孔已经覆盖了射流冲击区, 表面变得严重凹凸不平, 滑移带等塑性变形痕迹也被损伤所覆盖而变得模糊(图6d)。由此可知射流压力对空蚀损伤影响很大, 特别是射流压力从30 MPa提高到35 MPa过程中, 损伤发生了质变。这是因为空化因子(σ)受射流速度(V_0)影响极大。根据有关资料[1]可知: $\sigma \propto 1/V_0^2$, 流速越大, 即喷丸压力越大, 空化因子σ越小, 空化现象越明显, 从而将会有更多的气泡参与到空蚀破坏过程, 导致空蚀损伤过程明显加速。通过对25 MPa压力下射流冲击区的原位跟踪观察, 射流处理180 min也没有出现明显的剥落和损伤。

射流压力对紊流区和过渡区空蚀损伤的影响同射流冲击区相类似, 都有一个损伤加速的过程。所不同的是, 紊流区对射流压力的敏感性较低, 即使在低压力(25 MPa)的情况下, 长时间的射流处理也会产生大量的塑性变形, 这是因为与射流冲击区处的诱导空化气泡相比, 紊流区自由空化气泡受射流压力影响较小。

2.2 加工硬化和粗糙度变化

图7是35 MPa压力下射流冲击区表面显微硬度和面粗糙度随时间的变化曲线。由图7a可知, 实验过程中试样表面产生了明显的加工硬化现象, 且在水射流处理50 min左右, 加工硬化达到峰值, 说明此时试样的塑性变形达到了极限, 之后损伤急剧发展, 硬度也随之下降, 这和之前表面形貌的观察基本吻合。由图7b可知, 面粗糙度曲线在50 min左右斜

率最高, 说明此时面粗糙度快速上升, 损伤急剧发展, 与之前的表面形貌观察也基本吻合。

2.3 表层组织

304不锈钢是面心立方晶体, 塑性变形方式主要为滑移和孪生, 其中滑移带属于断口形貌特征, 经磨制后的金相试样是看不到的, 因此横截面出现的变形特征均是孪晶。如图8所示, 分别是35 MPa压力下, 空化水射流处理50 min后射流冲击区、过渡区和紊流区的横截面组织形貌, 可以看到了射流冲击区有一定剥落, 在靠近边缘的上方可以看到一簇与冲击区表面约呈60°的形变交割孪晶(图8a)。过渡区和紊流区均没有明显剥落, 但可以看到比射流冲击区更厚的形变孪晶层, 其中紊流区形变孪晶层厚度达140 μm(图8b, 8c)。这是因为射流冲击区的损伤剥落释放了应变能量, 导致能量不能累积传给次表层, 而过渡区和紊流区的应变能可以有效累积, 这也与表面形貌的观察相吻合。通常情况下, 面心立方金属滑移系较多, 常温下位错滑移是滞留形变的主要方式, 形变孪晶少见。但已有研究表明, 材料的孪生-滑移变形机制的转变会受到很多因素的影响, 包括应力加载方式、加载应变率、堆垛层错能、晶粒大小和胞结构等[16]。一般来说, 变形速率越大、晶粒越大、温度越低都会使孪生更容易发生[17]。由于高压水射流的高应变速率(可达到10^4 s^{-1}[4])形变时间极短, 位错的增殖和长程迁移变得困难, 而孪晶形成只需微区形变, 所以孪生变形也变得容易发生。综上

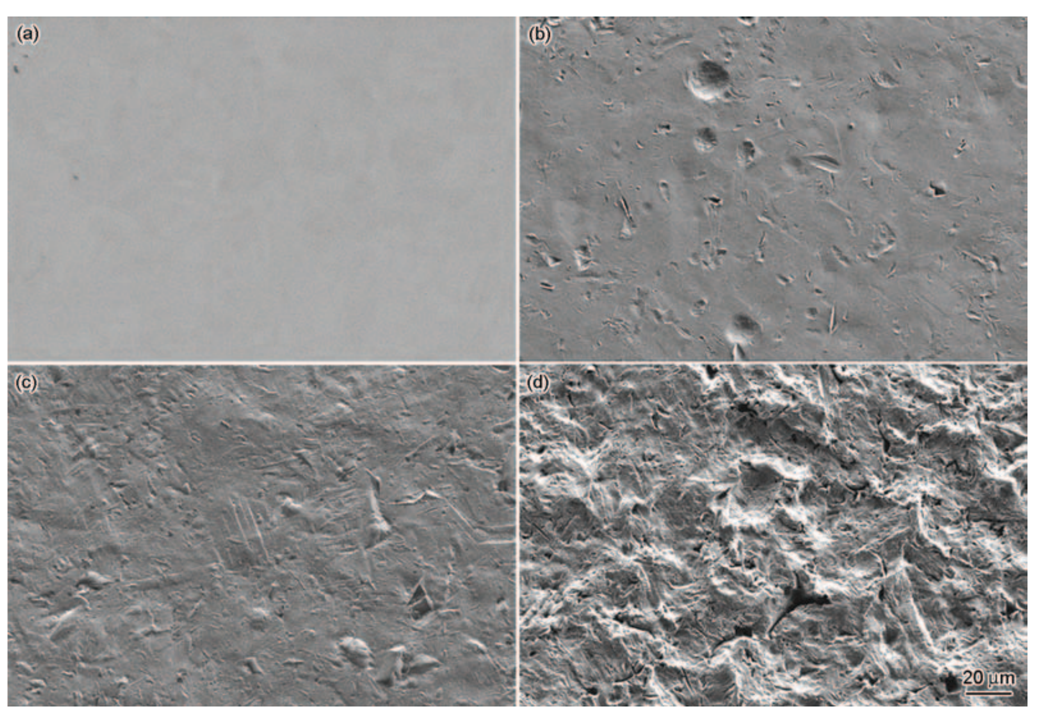
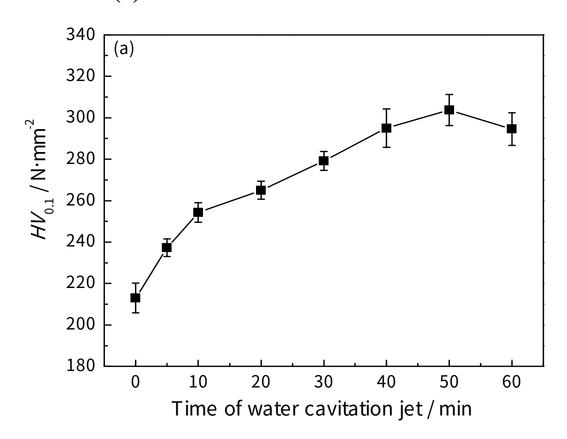


图6 不同压力下处理60 min射流冲击区形貌

Fig.6 Morphologies of water jet impact zone treated for 60 min under (a) 0 MPa; (b) 25 MPa; (c) 30 MPa; (d) 35 MPa



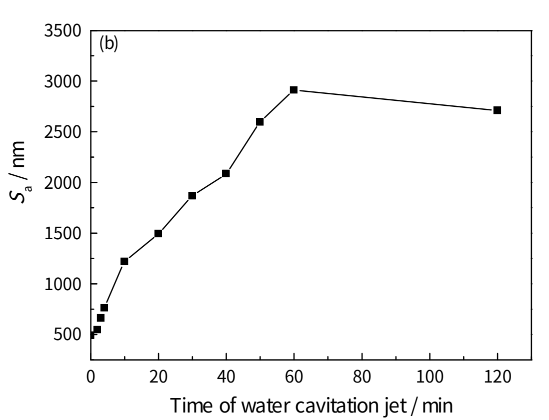


图7 35 MPa压力下试样射流冲击区表面显微硬度和面粗糙度

Fig.7 Evalution of microhardness (a) and surface roughness (b) of specimen in water jet impact zone under 35 MPa

所述, 在本工艺条件下304不锈钢的变形方式为: 位错滑移为主, 孪生变形为辅。

对水射流处理前后的样品进行了XRD测定, 结果得出样品表面物相没有发生变化, 衍射峰也没有明显宽化, 说明在本工艺条件下304不锈钢没有发生相变, 晶粒大小也无明显变化, 这与横截面晶粒形貌观察结果相吻合。

2.4 损伤机理的讨论

由于紊流区和过渡区都没有明显的剥落, 在这里主要讨论射流冲击区的损伤机理。图9a是30 MPa压

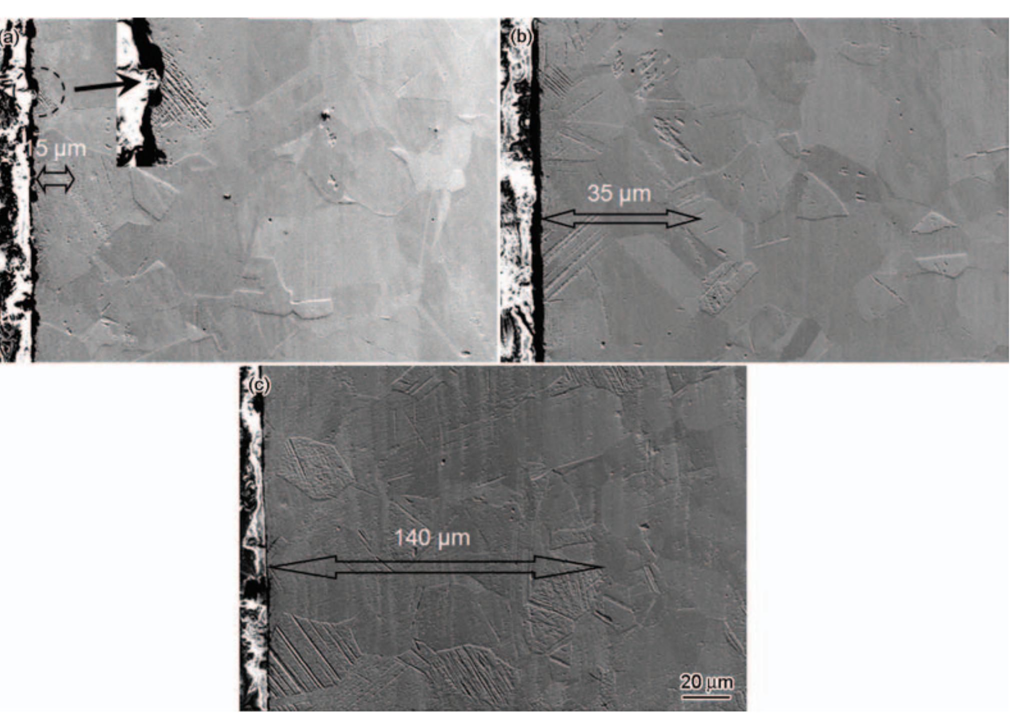


图8 35 MPa水射流处理50 min横截面组织形貌

Fig.8 Cross-sectional morphologies of (a) water jet impact zone; (b) transition zone and (c) turbulent zone of the specimen after water jet process under 35 MPa for 50 min

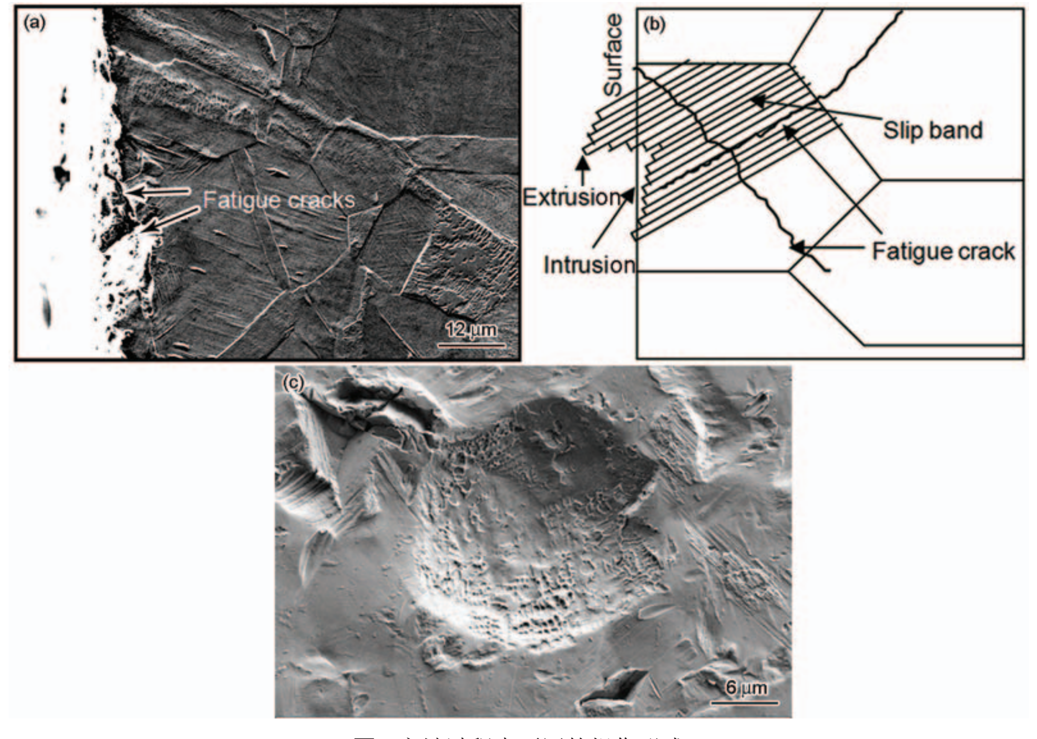
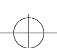


图9 空蚀过程中不同的损伤形式

Fig.9 Different damage actions in cavitation process (a) crack propagation on the cross-section under 30 MPa for 120 min; (b) schematic diagram of fatigue crack growth; (c) plastic deformation pit on the surface under 30 MPa for 10 min



力下空化水射流处理120 min后试样的射流冲击区的横截面形貌。由图9a可知, 两条与表面大约呈45°的角度的裂纹发生了汇聚, 导致材料大面积剥落, 其中一条裂纹萌生于晶界, 另一处萌生于滑移带的隆起处。

通常在空化水射流反复冲击力的作用下, 材料易发生疲劳破坏。从前述射流冲击区的损伤看, 滑移带变宽是一种典型的疲劳破坏过程, 往往伴随着材料表面的挤入和挤出。滑移带层间由于有严重的应变梯度, 在交变载荷的作用下易萌生疲劳裂纹, 随后会沿着与表面大约呈45°的角度向内扩展, 当裂纹发生汇聚时, 材料就会发生剥落, 其示意图如图9b所示。这是试样在处理时最常见的损坏形式, 通常发生在空蚀破坏的后期。

另外一种损坏形式发生在空蚀破坏前期(10 min), 是由于气泡爆破后形成的微射流所造成的, 类似于快速运动的外来颗粒的机械作用, 通常会在材料表面形成一个大的塑性变形坑(图9c)。在坑的内部有大量小弧坑, 可以清晰看出弧坑凸缘部分的强烈塑性变形和在弧坑之间的狭窄区域所形成的折叠和脊顶的剥落。它并不是由于裂纹的扩展造成的, 而是材料表面的塑性变形、颈缩和剥落所致。这些弧坑在空蚀后期会成为疲劳损伤源, 进一步加重材料的损伤与剥落。

3 结　论

1. 根据损伤程度和作用机理的不同, 空蚀损伤区从中心到外围可以分为射流冲击区、过渡区和紊流区三个区, 其中射流冲击区损伤最严重, 紊流区次之, 过渡区最弱。

2. 当射流压力为35 MPa、处理40 min时, 射流冲击区损伤速度加快, 并且呈现明显的疲劳损伤特征, 滑移带和晶界处疲劳裂纹萌生和扩展是导致该区损伤剥落的重要原因; 射流压力是影响空蚀损伤程度的重要参数, 当射流压力为25 MPa时, 处理120 min以上也不会造成明显损伤。

3. 在横截面金相组织中, 过渡区和紊流区出现比射流冲击区更深的形变孪晶层, 且紊流区形变孪晶层厚度达140 μm; 在本实验条件下304不锈钢变形方式为: 滑移为主, 孪生为辅。

4. 试样在空化水射流的作用下有两种空蚀破坏机理, 即交变载荷下的疲劳破坏, 以及塑性变形、颈缩和剥落导致的弧坑。

参 考 文 献

1　HUANG Jitang, *Principle and Application of Cavitation and Cavitation Erosion*, (Beijing, Tsinghua Uinversity Press, 1991) p.50
(黄继汤, 空化与空蚀的原理及应用, (北京, 清华大学出版社, 1991)p.50)

2　LIU Wei, ZHENG Yugui, YAO Zhiming, KE Wei, Research progress on cavitation erosion of metallic materials, Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, **21**(4), 250(2001)
(柳　伟, 郑玉贵, 姚治铭, 柯　伟, 金属材料的空蚀研究进展, 中国腐蚀与防护学报, **21**(4), 250(2001))

3　CHEN Darong, Cavitation and cavitation erosion, China Basic Science, **12**(6), 3(2010)
(陈大融, 空化与空蚀研究, 中国基础科学, **12**(6), 3(2010))

4　J. A. Venables, J. P. Hirth, H. C. Rogers, In deformation twinning, Gordon and Breach Science Publishers, London, **25**, 77(1963)

5　M. A. Meyers, Y. B. Xu, Q. Xue. Micro-structural evolution in adiabatic localization in stainless steel, Acta Materialia, **51**, 1307(2003)

6　Singh R, Tiwari S K, Mishra S K, Cavitation erosion in hydraulic turbine components and mitigation by coatings, current status and future needs, Journal of Materials Engineering Performance, **21**(7), 1539(2012)

7　SHI Yeting, The research on the resistance of the cavitation performance of pure titanium and TC4 titanium alloy, Master thesis, Tianjin University, 2012
(史烨婷, 纯钛及TC4钛合金抗空蚀性能的研究, 硕士学位论文, 天津大学(2012))

8　B .S. Mann, Vivek Arya, B. K.Pant, Cavitation erosion behavior of HPDL-treated TWAS-coated Ti6Al4V alloy and its similarity with water droplet erosion, Journal of Materials Engineering and Performance, **21**(6), 849(2012)

9　S. R. Daniewicz, S. D. Cummings, Characterization of a water peening process , Transaction of the ASME, **121**(3), 336(1999)

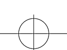
10　CAI Shigang, LIU Pengtao, ZHAO Xiujuan, Water cavitation peening-induced surface hardening and cavitation damage of pure titanium, China Surface Engineering, **27**(1), 100(2014)
(蔡世刚, 刘鹏涛, 赵秀娟, 纯钛空化水喷丸处理表面强化及空蚀损伤, 中国表面工程, **27**(1), 100(2014))

11　S. N. Buravova, Yu. A. Gordopolov, Cavitation erosion as a kind of dynamic damage, International Journal of Fracture, **170**(2), 83 (2011)

12　KAN Xiaoyang, LIU Pengtao, ZHOU Maoyang, ZHAO Xiujuan, CHEN Chunhuan, REN Ruiming, Cavitation erosion on surface of pure titanium in water cavitation jet, Journal of Aeronautical Materials, **35**(4), 22(2015)
(阚晓阳, 刘鹏涛, 周卯旸, 赵秀娟, 陈春焕, 任瑞铭, 纯钛空化水射流处理表面空蚀损伤研究, 航空材料学报, **35**(4), 22(2015))

13　A. Azhari, C. Schindler, K.Hilbert, Influence of waterjet peening and smoothing on the material surface and properties of stainless steel 304, Surface & Coatings Technology, **258**, 1176(2014)

14　WANG Junwen, Experimental study on water cavitation peening technology to 50Mn, Master thesis, Dalian Jiaotong University, 2006
(王俊文, 50Mn空化水喷丸强化技术的研究, 硕士学位论文, 大连交通大学(2006))



15 XU Yiji, Basic research on the theory and application of ultra-high pressure water jet, PhD thesis, Southwest Petroleum University, 2004
(徐依吉, 超高压水射流理论与应用基础研究, 博士学位论文, 西南石油大学(2004))

16 X. Q. Zhu, M. Zhou, Q. Dai, Deformation modes in stainless steel during laser shock peening, Journal of Manu Facturing Science & Engineering, **131**(5), 611(2009)

17 J. P. Chu, J. M. Rigsbee, G. Banaset, Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel, Materials Science and Engineering, **260**(1), 260 (1999)